

УДК 621.92.01

Н.В. ЛІЩЕНКО, канд. техн. наук,
В.П. ЛАРШИН, д-р техн. наук, Одеса,
О.М. КОВАЛЬЧУК, канд. техн. наук, Харків, Україна

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ПРОФІЛЬНОМУ ЗУБОШЛІФУВАННІ

Виконано імітаційне 3D моделювання температурного поля при профільному зубошліфуванні з урахуванням евольвентної форми профілю зуба, змінної щільності теплового потоку по висоті зуба і в умовах дії примусового охолодження, як це має місце в дійсності. Зазначені особливості профільного зубошліфування неможливо вивчити при звичайному експериментальному дослідженні операції зубошліфування через відсутність відповідних датчиків температури в зоні різання або спотворення цими датчиками (коли вони є) природного температурного поля.

Ключові слова: профільне зубошліфування, температура, імітаційне моделювання.

Выполнено имитационное 3D моделирование температурного поля при профильном зубошлифовании с учетом эвольвентной формы профиля зуба, переменной плотности теплового потока по высоте зуба и в условиях действия принудительного охлаждения, как это имеет место в действительности. Указанные особенности профильного зубошлифования невозможно изучить при обычном экспериментальном исследовании операции зубошлифования по причине отсутствия соответствующих датчиков температуры в зоне резания либо искажения этими датчиками (когда они есть) естественного температурного поля.

Ключевые слова: профильное зубошлифование, температура, имитационное моделирование.

Simulated 3D modeling of the temperature field for profile gear grinding was carried out, taking into account the involute shape of the tooth profile, the variable heat flux density over the tooth height and under forced cooling conditions, as it is the case in reality. These features of profile gear grinding cannot be studied in the usual experimental study of the grinding operation due to the absence of appropriate temperature sensors in the cutting zone, or (when they exist) these sensors distort the natural temperature field.

Key words: profile grinding, temperature, simulation.

Постановка проблеми. До числа основних вимог до якості зубчастих коліс (ЗК) відноситься відсутність припиків та мікротріщин. Якість поверхневого шару формується на зубошліфувальній операції. Найбільше застосування в сучасних технологіях зубошліфування на верстатах з ЧПК одержали два методи: метод копіювання, тобто профільного шліфування і метод обкату черв'ячним шліфувальним кругом, тобто метод черв'ячного шліфування. Перший метод відрізняється більш високою точністю (DIN 3-6) при однаковій продуктивності вказаних методів, а другий – більш високою продуктивністю при однаковій точності.

Відомо, що шліфувальні припіки та мікротріщини викликані температурним фактором, тому задача визначення температури профільного зубошліфування з урахуванням умов, які не можна задати при аналітичному рішенні теплової задачі

(змінна по висоті зубу щільності теплового потоку, геометрична форма зуба з його евольвентною формою профілю, вплив примусового охолодження тощо відноситься до числа актуальних у технології машинобудування. Вирішення цієї проблеми дозволить забезпечити адаптацію елементів технологічної системи до умов обробки (elements consensus), в яких відбивається різноманіття діючих факторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо два методи до визначення температури шліфування: аналітичний – на основі рішення диференціального рівняння теплопровідності Фур'є (математичне моделювання на основі феноменологічного підходу до визначення температури) [1-8] і імітаційне моделювання температурного поля – на основі комп'ютерного моделювання методом кінцевих елементів [9-13].

Для розробки математичного забезпечення вбудованих підсистем проектування, моніторингу і технологічної діагностики операції профільного зубошліфування, які працюють у режимі реального часу, перевагу має аналітичний метод, тому що вимагає меншого часу для ухвалення рішення: час виконання обчислень температури за аналітичними формулами (мікросекунди) є набагато менше, ніж час імітаційного моделювання температурного поля (30-40 хвилин). Другий підхід є більш трудомістким і може використовуватися для обґрунтування правомірності першого, пошуку умов його використання.

Аналітичному методу визначення температури профільного зубошліфування присвячено декілька робіт [1, 2, 14]. Однак рішення, які наведено в цих роботах отримані з припущеннями: постійна або лінійна зміна щільності теплового потоку уздовж і поперек зони контакту, не оцінено вплив охолодження на температуру шліфування.

У роботі [11] виконано аналіз температурного поля методом кінцевих елементів (FEM) у програмі ANSYS з урахуванням адіабатичної стінки на торці зуба. У роботі отримано результати моделювання температури по довжині зуба по мірі переміщення рухливого прямокутного теплового джерела, який рухається зі швидкістю 1 м/хв. Однак при багатопрхідному профільному шліфуванні осьова подача змінюється в діапазоні від 1 м/хв до 12 м/хв. Тому варто встановити вплив осьової подачі на температуру шліфування, наприклад, методом кінцевих елементів.

Виділення невідомих раніше частин загальної проблеми. Виконаний аналіз наявних досліджень показав, що в літературі відсутні відомості за методикою 3D імітаційного моделювання при профільному зубошліфуванні з урахуванням евольвентної форми профілю зуба, змінної щільності теплового потоку по висоті зуба і в умовах дії примусового охолодження, як це має місце в дійсності. Зазначені особливості профільного зубошліфування неможливо вивчати при звичайному експериментальному дослідженні зубошліфування через відсутність відповідних датчиків температури в зоні різання або спотворення цими датчиками (коли вони є) природного температурного поля.

Метою статті є розробка методики імітаційного моделювання температурного поля, його дослідження з урахуванням температурних умов максимально наближених до реальних і розробка технологічних рекомендацій щодо забезпечення профільного зубошліфування без припиків на верстатах з ЧПК.

Матеріали дослідження. Одновимірне рішення за певних умов, які необхідно встановити, дозволяє одержати температуру шліфування дуже близьку до відповідних розрахунків за три- (рис.1, а) і двовимірним (рис. 1, б) аналітичними рішеннями.

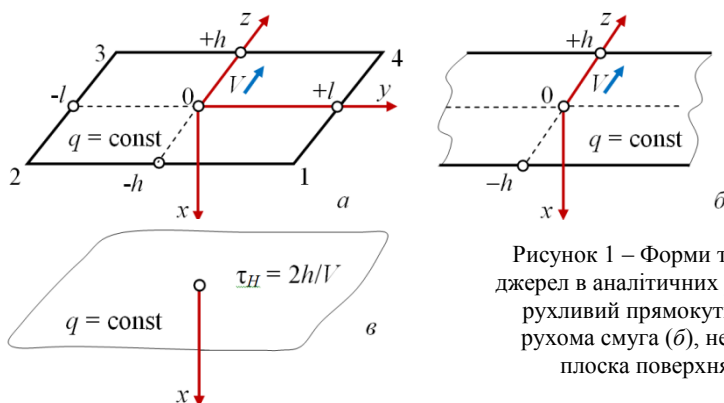


Рисунок 1 – Форми теплових джерел в аналітичних рішеннях: рухливий прямокутник (а), рухома смуга (б), нерухома плоска поверхня (в)

Це має місце при двох умовах: 1) якщо рухливе джерело має велику швидкість, тобто при числі Пекле $He \geq 4$ [5], 2) зона контакту (рис. 1, а) повинна мати таку довжину, при якій вектори теплового потоку в центрі цієї зони паралельні один одному і спрямовані перпендикулярно до оброблюваної поверхні (лінійний тепловий потік за термінологією Г. Карслоу і Д. Егера [15]. Для визначення температури профільного зубошліфування з використанням рішення одновимірного диференціального рівняння теплопровідності була прийнята наступна концепція. Зазначим, тобто одновимірним рішенням (рис. 1, в), можна користуватися для визначення температури в центрі декількох ділянок поверхні евольвентного профілю зуба (западни), розташованих по висоті зуба, наприклад, у верхній, середній і нижній частинах евольвентного профілю. Кількість цих ділянок повинна бути мінімальною і достатньою. Умова паралельності векторів теплового потоку має місце при наявності достатньої за площею поверхні зі змінною щільністю теплового потоку, яку можна охарактеризувати середнім її значенням (mean value). Очевидно, що ця умова найбільш повно виконується в точці зони контакту, яка рівновіддалена від країв цієї зони (equidistant from the edges of this zone). Для підтвердження цієї концепції і конкретизації вищевказаних

умов необхідно виконати комп'ютерне імітаційне моделювання температурного поля (temperature field computer simulation), наприклад, у середовищі програми COMSOL Multiphysics.

Розробка моделі (modelling) для подальшого імітаційного моделювання (simulation) температурного поля виконується за наступним планом.

1. Засобами комп'ютерної графіки (віртуальна фізична модель) побудувати геометричну модель взаємодіючих твердих тіл (ЗК і шліфувальний круг), забезпечуючи максимальну відповідність геометричних форм дотичних поверхонь їх ідеальним геометричним формам (допущення при імітаційному моделюванні).

2. Засобами комп'ютерної програми COMSOL Multiphysics реалізувати віртуальний процес поширення температурного поля для рухливого теплового джерела шириною $2h$ (рис. 1, *a*), що рухається в напрямку осі z зі швидкістю $V = V_f$ по бічній поверхні зуба ЗК при граничних умовах другого роду зі змінною по евольвентному профілю щільністю теплового потоку $q(r_x)$, де r_x – поточний радіус-вектор евольвентного профілю.

3. Вивчити перехідний процес формування температурного поля (відсутній в аналітичних рішеннях три- і двовимірних диференціальних рівнянь теплопровідності (розмірність простору 3D)).

4. Порівняти отримане стає температурне поле від рухомого теплового джерела зі швидкістю V (розмірність простору 3D) з аналогічним полем від нерухомого теплового джерела (розмірність простору 2D), який діє час $\tau_H = 2h/V_f$ і має ту ж саму щільність теплового потоку для одних і тих же точок евольвентного профілю.

5. Визначити кількість ділянок, в центрі яких визначають температуру за одновимірним рішенням для нерухомого теплового джерела (розмірність простору 2D).

Аналітичні рішення, як правило, отримані при постійній щільності теплового потоку (heat flux density), який має місце в зоні плями контакту незалежно від просторових координат цих точок і часу, тобто $q(r_x) = \text{const}$. При імітаційному моделюванні щільність теплового потоку може бути задана змінною як в межах зони контакту (тобто в різних точках поверхні плями контакту) так і за часом. Будь-яка залежність щільності теплового потоку від координат точок і часу може бути задана і це безпосередньо позначиться на температурному полі як в зоні поверхні плями контакту, так і за межами цієї зони. Миттєву щільність теплового потоку в кожній точці евольвентного профілю зуба визначають за формулою, яка встановлена в роботі [5], тобто

$$q(r_x) = A_{num} \Psi V_f t_n(r_x) / \sqrt{Dt_v}, \quad (1)$$

де A_{num} – питома робота шліфування, Дж/мм³; ψ – коефіцієнт теплового провідності; V_f – осьова подача, мм/хв; D – миттєвий діаметр шліфувального круга, мм. Для визначення миттєвої нормальної глибини шліфування t_n можна скористатися або прийомами диференціальної геометрії, або відомим рівнянням зв'язку між вертикальною t_v і нормальною t_n глибинами зубошліфування [2], причому $t_n = t_v \cos \gamma$, де γ – кут між нормаллю до евольвенти і віссю симетрії западини ЗК.

Вихідні дані для визначення миттєвої щільності теплового потоку: $A_{num} = 54$ Дж/мм³; $\psi = 0,8$; $D = 400$ мм; $t_v = 0,074$ мм; $V_f = 116,67$ мм/с (7 м/хв). Теплофізичні параметри сталі 20Х2Н4А: $a = 5,68 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda = 24$ Вт/(м·°С); $\rho = 7850$ кг/мм³; $C_p = 538$ Дж/(кг·°С). Параметри ЗК: $z = 40$; $m = 3,75$; $d = 150$ мм; $d_a = 153,75$ мм; $d_b = 40,954$ мм; $d_f = 139,875$ мм; $x = -0,3$; $\alpha = 20^\circ$; $\beta = 0$.

Час дії теплового джерела визначають за формулою $\tau_H = 2h / V_f = \sqrt{Dt_v} / V_f$, де $2h = \sqrt{Dt_v} / V_f$ – ширина зони контакту в напрямку вектора швидкості деталі, мм. В даному випадку $\sqrt{400 \cdot 0,074} / 116,67 = 0,046$ с, тобто $\tau_H = 46,6$ мс.

Щільність теплового потоку визначають за формулою (1). Отримуємо діапазон зміни параметру q від 2,044 до 30,77 Вт/мм² (рис. 2).

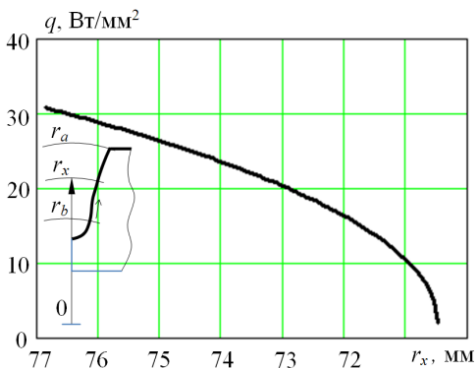


Рисунок 2 – Зміна щільності теплового потоку $q = q(r_x)$ в залежності від радіус-вектора r_x розглянутої точки евольвентного профілю

Геометрична модель зони контакту шліфувального круга і ЗК (рухоме теплове джерело) для визначення температурного поля (рис. 3) створена в програмі AutoCAD і імпортована в середовище COMSOL Multiphysics. Вона представляє собою ділянку поверхні, яка є спільною між шліфувальним кругом і ЗК. Евольвентний профіль зуба ЗК і профіль шліфувального круга складається з 99 мікроділянок. Профіль шліфувального круга має прямокутну ділянку контакту з висотою ($r_a - r_b$) і шириною $2h$, що відповідає ширині

теплого джерела. Причому $h = 2,72 \cdot 10^{-3}$ м, тобто $2h = 5,44 \cdot 10^{-3}$ м, або 5,44 мм.

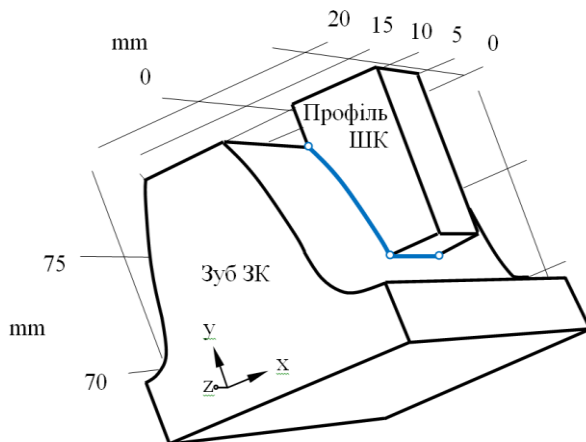


Рисунок 3 – 3D - геометрична модель сполучених об'єктів: зубу ЗК і профілю шліфувального круга

Запуск програми COMSOL Multiphysics здійснюється за наступною схемою.

1. File → New → Model Wizard (навігатор моделей).
2. Model Wizard → 3D → Select Physics → Heat Transfer in Solid (модуль) → Add → Study → Select Study → Time dependent → Done.

Далі виконують імпорт геометричної моделі з програми AutoCAD. Управління процедурою моделювання проводиться за допомогою конструктора моделей Model Builder, який включає дерево моделі. Це дерево відображає структуру і функціональність моделі, а також операції, які необхідні для її побудови і рішення з подальшою обробкою результатів.

Схема роботи Model Builder → GEOMETRY 1 наступна. На панелі інструментів Home → Import.

1. У вікні Settings для Import натисніть Browse (для вибору необхідного файлу). У рядку File name з'явиться вікно, де вказують місце розташування файлу з геометричним об'єктом, створеним, наприклад, у програмі AutoCAD.
2. У вікні Settings → Import.
3. На панелі інструментів Geometry → Booleans and Partitions → Difference.
4. На поле Graphics виділіть геометричний об'єкт – зуб ЗК. При цьому у вікні Settings для Difference у вікні Objects to add з'явиться назва цього об'єкта – impl1(1). У вікні Objects to subtract активізують кнопку Active і в поле Graphics виділяють другий геометричний об'єкт – шліфувальний круг. При

цьому у вікні Objects to subtract з'явиться назва другого об'єкта – imp 1 (2). Натискають Active.

5. У вікні Settings → Build Selected.

При цьому об'єкт imp1 (2) зникне, залишивши слід на об'єкті imp1(1) (рис. 4).

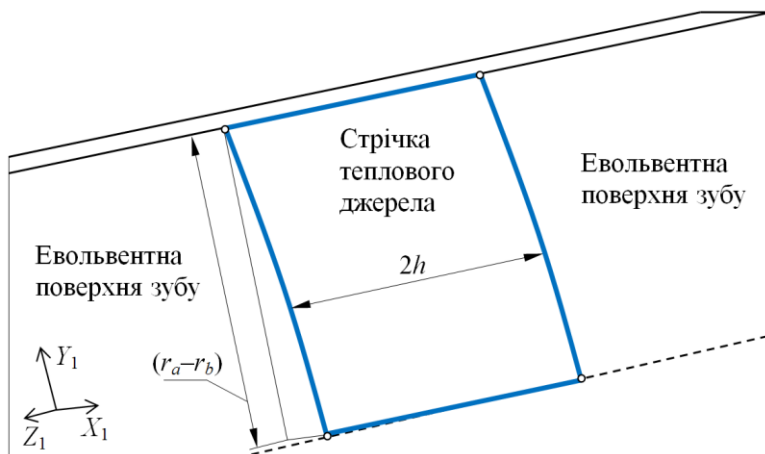


Рисунок 4 – Зуб 3К зі стрічкою шириною $2h$

Далі Model Builder → MATERIALS (вказують теплофізичні параметри матеріалу) → Material 1.

1. На панелі інструментів Material → Blank Materials.

2. У вікні Settings для Materials задати теплофізичні властивості матеріалу: (thermal conductivity k (Вт/м·К), Density ρ (кг/м³), Heat capacity at constant pressure C_p (Дж/(кг·К))).

3. У поле Selection зазначена область, для якої задають теплофізичні властивості. Натиснути Active (тому що об'єкт один, то в цьому полі цифра 1).

Далі задають початкові умови: Model Builder → HEAT TRANSFER IN SOLIDS (задають початкові умови) → Initial Values 1.

1. У вікні Model Builder → Component 1 → Heat Transfer in Solids → Initial Values 1.

2. У вікні Settings для Initial Values 1 вказати температуру в момент часу $\tau = 0$, тобто $T = 293$ К (20 °С).

Далі задають граничні умови: Model Builder → HEAT TRANSFER IN SOLIDS → Heat flux 1.

1. На панелі інструментів Physics → Boundaries → Heat Flux.

2. У вікні Settings для Heat Flux поставити маркер біля General inward heat flux q_0 . Тобто задають граничну умову II роду: $-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_0$ (\mathbf{n} – вектор одиничної

нормалі до границі розрахункової області; q_0 – фіксована (незалежна) складова щільності потоку теплової потужності через граничну поверхню, Вт/м²; \mathbf{q} – вектор теплового потоку, Вт/м²; $\mathbf{q} = -k\overline{\nabla T}$; $k = \lambda$ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·°C; $\overline{\nabla T}$ – градієнт температури, °C/м.

3. На поле Graphics вибрати ділянку евольвентного профілю (1 із 99), на якій необхідно задати значення щільності теплового потоку.

4. В текстовому полі вказують значення щільності теплового потоку. Натискають Active. Аналогічно задають щільність теплового потоку на інших ділянках смуги шириною $2h$.

5. На панелі інструментів Physics → Boundaries, вибирають Thermal Insulation. Ця умова має вигляд $-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0$.

6. У вікні Settings для Thermal Insulation вказати для яких областей геометричного об'єкта обрана ця умова (на усіх областях, крім стрічки шириною $2h$ обрано цю умову). Натискають Active. Далі Model Builder → HEAT TRANSFER IN SOLIDS → Solid 1.

7. На панелі інструментів Physics → Attributes, вибирають Translation Motion (завдання інформації про рух).

8. У вікні Settings (для Translation Motion) в полі Velocity field задають швидкість теплового джерела ($\mathbf{u}_{\text{trans}}$, м/с) в напрямку осі z . Наприклад, якщо осьова подача (швидкість теплового джерела) 7 м/хв, то $\mathbf{u}_{\text{trans}} = 0,1167$ м/с.

Рівняння теплопровідності у вікні програми має вигляд

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \overline{\nabla T} + \overline{\nabla} \cdot \mathbf{q} = Q \quad (2)$$

де ρ – густина матеріалу, кг/м³; C_p – питома теплоємність, Дж/(кг·°C); \mathbf{u} – вектор швидкості, м/с; $\overline{\nabla T}$ – градієнт температури, °C/м; \mathbf{q} – вектор теплового потоку, Вт/м²; Q – потужність теплового джерела в одиниці об'єму, Вт/м³.

Перетворюючи рівняння (2) для $Q = 0$ отримуємо відоме рівняння для рухомого джерела тепла [3]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + u_z \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (3)$$

Видно, що отримане диференціальне рівняння теплопровідності (3) відповідає його канонічному виду для тривимірної постановки теплофізичної задачі в аналітичному вигляді [3,16].

Далі Model Builder → Mesh 1.

1. У вікні Model Builder під Component 1 клікнути Mesh 1.

2. У вікні налаштування для Mesh вибирають Build All.

Далі Model Builder → Study 1 → Step 1: Time Dependent.

1. У вікні Model Builder під Study 1 клікнути Step1: Time Dependent.

2. У вікні Settings (для Time Dependent) вказати одиниці виміру часу Unit (s).

3. У секції Study Settings у текстовому полі Times вказати інтервал часу в секундах (range), для якого треба знайти температурне поле, тобто: 0, 0.0115, 0.023, 0.0345, 0.046, 0,1035 с.

На панелі інструментів Study натискають Compute або на панелі інструментів Home обирають Compute.

Результати моделювання температури на поверхні в програмі COMSOL Multiphysics для 3D-геометричної моделі можна побачити наступним чином: Model Builder → Results → Temperature → Surface 1.

1. На панелі інструментів Temperature обирають Surface.

2. У вікні Settings (для Surface) вказати одиниці виміру температури для відображення графіка (degC) (рис. 5).

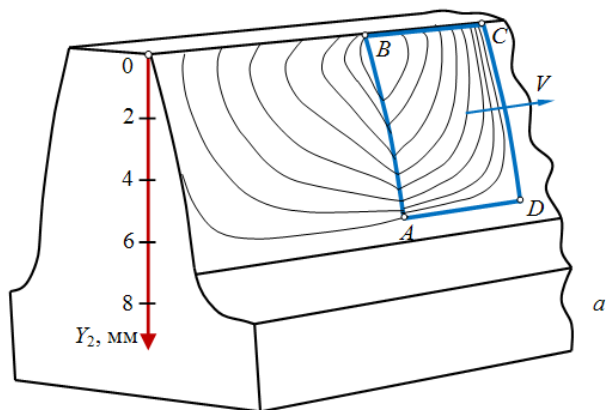
3. На панелі інструментів Results обирають 1D Plot Group.

4. На панелі інструментів 1D Plot Group клікнути 1D Graph.

5. У вікні Settings (для Line Graph) вибрати одиниці відображення температури (degC).

6. На поле Graphics клікнути на гранях евольвентного профілю зуба (здня крайка смуги 2h. При цьому у полі вікна Settings з'являються номери граней евольвентного профілю.

Після завдання всіх граней натискають Active. На полі Graphics з'явиться графік Line Graph (рис. 5, б): Temperature (degC) в залежності від координати Y_2 тобто $T(Y_2)$ в градусах Цельсія.



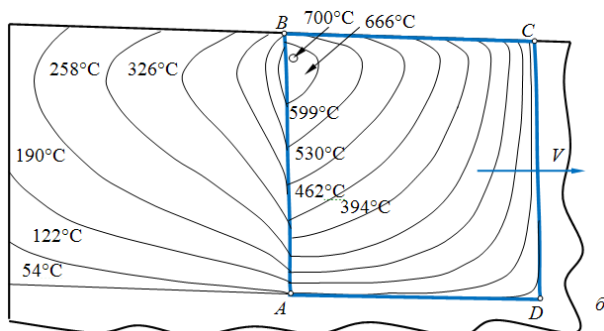


Рисунок 5 – Загальний вид об'єкта (а) після отримання результату імітаційного моделювання температурного поля (б) від прямокутного рухливого джерела $ABCD$ при зубошліфуванні через час $\tau = 103,5$ мс від моменту $\tau = 0$ (перехідний процес закінчено)

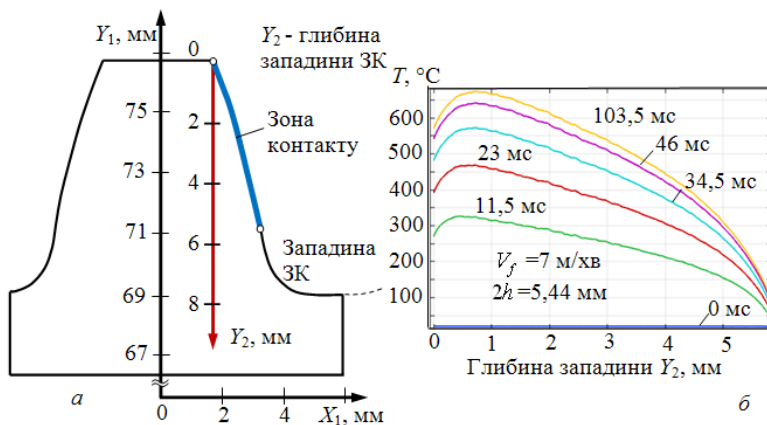


Рисунок 6 – Розташування осі Y_2 системи координат (а) і залежності $T(Y_2)$ в градусах Цельсія (б) в різні моменти часу: 0 мс; 11,5 мс; 23 мс; 34,5 мс; 46 мс; 103,5 мс

Встановлено, що максимальні значення температури (рис. 6) і щільності теплового потоку (рис. 2) розташовані в верхній частині евольвентного профілю зуба і не співпадають по висоті зуба, причому максимум температури (рис. 6, б) розташовано нижче максимуму щільності теплового потоку (рис. 2), який знаходиться на вершині зуба. Вивчено перехідний процес формування температурного поля навколо рухомого теплового джерела і встановлено час теплового насичення: 50 мс при $V_f = 12$ м/хв, 100

мс при $V_f = 7 \text{ м/хв}$ і 150 мс при $V_f = 3 \text{ м/хв}$. Встановлено, що час теплового насичення вдвічі перевищує час, який дорівнює відношенню ширини джерела до швидкості його переміщення. Наприклад, при $V_f = 7 \text{ м/хв}$ час теплового насичення 100 мс (рис.4.22), а $2h/V_f = 5,44 \text{ мм} / 7000 \text{ мм/хв} = 5,44 \text{ мм}/116,7 \text{ мм/с} = 0,0466 \text{ с} = 46,6 \text{ мс}$. Тобто час теплового насичення (90-100 мс) більш ніж удвічі перевищує величину $\tau_H = 2h/V_f$ (46,6 мс).

Висновки і перспективи розвитку

1. Виконано імітаційне моделювання температурного поля при профільному зубошліфуванні, що дозволило встановити вплив таких особливостей профільного зубошліфування на температуру як: евольвентна форма профілю зуба, змінна щільність теплового потоку по висоті зуба, а також дія примусового охолодження. Ці особливості неможливо вивчити при звичайному експериментальному дослідженні операції зубошліфування через відсутність відповідних датчиків температури в зоні різання або спотворення цими датчиками (коли вони є) природного температурного поля.
2. На основі порівняння результатів імітаційного моделювання з відповідними даними при аналітичному три-, дво- і одновимірному моделюванні температурного поля встановлено можливість використання одновимірного диференціального рівняння теплопровідності Фур'є для визначення температури зубошліфування в діапазоні осьових подач, який фактично має місце на сучасних верстатах з ЧПК.
3. Встановлено такі особливості температурного поля при профільному зубошліфуванні: більш теплонапружена верхня частина профілю; розбіжність максимумів щільності теплового потоку та поверхневої температури; перехідний процес зміни температурного поля, що визначає час теплового насичення.

Список використаних джерел: 1. *Tan Jin* Determination of burn thresholds of precision gears in form grinding based on complex thermal modelling and Barkhausen noise measurements / Tan Jin, Jun Yi, Siwei Peng // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.– 2017. – Volume 88, Issue 1–4. – pp. 789–800. 2. *Tan Jin* Temperature distributions in form grinding of involute gears / Tan Jin, Jun Yi, Ping Li // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017.– Volume 88.– pp. 2609–2620. 3. *Сипайлов В.А.* Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / Сипайлов В.А. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с. 4. *Inasaki I.* Monitoring and Optimization of Internal Grinding Process / I. Inasaki // Annals of the CIRP. – 1991. – vol. 40/1.– pp. 359–362. 5. *Ларшин В.П.* Применение решений теплофизических задач к расчету температуры и глубины дефектного слоя при шлифовании / В.П. Ларшин, Е.Н. Ковальчук, А.В. Якимов // Межвузовский сборник научных трудов. — Пермь: Изд. ППИ, 1986. – С.9–16. 6. Аналитические методы исследования тепловых явлений при шлифовании: учеб. пособие / А.Н. Паршаков, Ю.А. Напарьин, В.И. Потемкин, Н.А. Ярмонов. – Пермь: Изд-во ПГУ, 1977. – 72 с. 7. *Tonshoff H. K.* Modelling and Simulation of Grinding Processes / H. K. Tonshoff, J. Peters, I. Inasaki, T. Paul // Annals of the CIRP Vol. 41/2.–1992. – pp. 677 – 688. 8. *Guo Changsheng* Energy Partition and Cooling During Grinding / Changsheng Guo, Stephen Malkin // Journal of Manufacturing Processes.– Vol. 2, No. 3. – 2000. – pp. 151 – 157. 9. *Patil Prashant* FEM Simulation and Analysis of Temperature Field of Environmental Friendly MQL Grinding / Prashant Patil Chandrakant Patil // Proceedings of the International Conference on Communication and Signal Processing 2016 (ICCASP 2016). – 2017. – pp. 182–186. 10. *Sharma Chahat* Finite Element Analysis of Workpiece Temperature

during Surface Grinding of Inconel 718 Alloy / Chahat Sharma, Sudarsan Ghosh, Prabal Talukdar // 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) December 12th–14th, 2014, IIT Guwahati, Assam, India.– 2014.– pp. 420-1–420-6.

11. *Xiaozhong Rena* Analysis on the Temperature Field of Gear Form Grinding / Xiaozhong Rena, Haifeng Hu // Applied Mechanics and Materials Vols. 633-634, 2014. – pp. 809–812. **12.** *Lei Zhang* Numerical Analysis and Experimental Investigation of Energy Partition and Heat Transfer in Grinding // Chapter 4 from the book Heat Transfer Phenomena and Applications pp.79 – 98. **13.** *Li Jing* Temperature distribution in workpiece during scratching and grinding / Jing Li, J.C.M. Li // Materials Science and Engineering A 409. – 2005. – pp. 108–119. **14.** *Golgels Christof* Optimization of the gear profile grinding process utilizing an analogy process / Christof Golgels, Heiko Schlattmeier, Fritz Klocke // Gear technology (November/December).– 2006.– pp.34-40. **15.** *Carslaw H.S.* Conduction of heat in solids. Second Edition / Carslaw H.S., Jaeger J.C. – Oxford University Press, 1959. – 510 p. **16.** *Larshin V.P., Lishchenko N.V.* Gear grinding temperature determination / V.P. Larshin, N.V. Lishchenko // Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта, матеріали XIX-ої міжнар. наук.-технічн. конф. 19-22 червня 2018 р., Київ: НТУУ «КПІ», 2018. – С. 91-94.

Bibliography (transliterated): **1.** *Tan Jin* Determination of burn thresholds of precision gears in form grinding based on complex thermal modelling and Barkhausen noise measurements / Tan Jin, Jun Yi, Siwei Peng // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.– 2017. – Volume 88, Issue 1–4. – pp. 789–800. **2.** *Tan Jin* Temperature distributions in form grinding of involute gears / Tan Jin, Jun Yi, Ping Li // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017.– Volume 88.– rr. 2609–2620. **3.** *Sipaylov V.A.* Teplovye protsessy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverkhnosti / Sipaylov V.A. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 167 s. **4.** *Inasaki I.* Monitoring and Optimization of Internal Grinding Process / I.Inasaki // Annals of the CIRP. – 1991. – vol. 40/1.– pp. 359-362. **5.** *Larshin V.P.* Primenenie resheniy teplofizicheskikh zadach k raschetu temperatury i glubiny defektnogo sloya pri shlifovanii / V.P. Larshin, E.N. Koval'chuk, A.V. Yakimov // Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov. — Perm': Izd. PPI, 1986. – S.9–16. **6.** Analiticheskie metody issledovaniya teplovyykh yavleniy pri shlifovanii: ucheb. posobie / A.N. Parshakov, Yu.A. Napar'in, V.I. Potemkin, N.A. Yarmonov. – Perm': Izd-vo PGU, 1977. – 72 s. **7.** *Tonshoff H. K.* Modelling and Simulation of Grinding Processes / H. K. Tonshoff, J. Peters, I. Inasaki, T. Paul // Annals of the CIRP Vol. 41/2.– 1992. – pp. 677 – 688. **8.** *Changsheng Guo* Energy Partition and Cooling During Grinding / Changsheng Guo, Stephen Malkin // Journal of Manufacturing Processes.– Vol. 2, No. 3. – 2000. – pp. 151 – 157. **9.** *Patil Prashant* FEM Simulation and Analysis of Temperature Field of Environmental Friendly MQL Grinding / Prashant Patil Chandrakant Patil // Proceedings of the International Conference on Communication and Signal Processing 2016 (ICCASP 2016).– 2017.– rr. 182-186. **10.** *Sharma Chahat* Finite Element Analysis of Workpiece Temperature during Surface Grinding of Inconel 718 Alloy / Chahat Sharma, Sudarsan Ghosh, Prabal Talukdar // 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) December 12th–14th, 2014, IIT Guwahati, Assam, India.– 2014.– rr. 420-1–420-6. **11.** *Xiaozhong Rena* Analysis on the Temperature Field of Gear Form Grinding / Xiaozhong Rena, Haifeng Hu // Applied Mechanics and Materials Vols. 633-634, 2014. – rr. 809–812. **12.** *Lei Zhang* Numerical Analysis and Experimental Investigation of Energy Partition and Heat Transfer in Grinding // Chapter 4 from the book Heat Transfer Phenomena and Applications pp.79 – 98. **13.** *Li Jing* Temperature distribution in workpiece during scratching and grinding / Jing Li, J.C.M. Li // Materials Science and Engineering A 409. – 2005. – pp. 108–119. **14.** *Golgels Christof* Optimization of the gear profile grinding process utilizing an analogy process / Christof Golgels, Heiko Schlattmeier, Fritz Klocke // Gear technology (November/December).– 2006.– pp.34-40. **15.** *Carslaw H.S.* Conduction of heat in solids. Second Edition / Carslaw H.S., Jaeger J.C. – Oxford University Press, 1959. – 510 p. **16.** *Larshin V.P., Lishchenko N.V.* Gear grinding temperature determination / V.P. Larshin, N.V. Lishchenko // Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта, матеріали XIX-ої міжнар. наук.-технічн. конф. 19-22 червня 2018 р., Київ: НТУУ «КПІ», 2018. – С. 91-94.